

[19]中华人民共和国国家知识产权局

[51]Int. Cl⁷

C01B 31/00

B23K 26/00

[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 00114290.9

[43]公开日 2000 年 11 月 15 日

[11]公开号 CN 1273215A

[22]申请日 2000.5.23 [21]申请号 00114290.9
[71]申请人 广东工业大学
地址 510080 广东省广州市东山区东风东路 729 号
[72]发明人 张海燕 何艳阳

[74]专利代理机构 华南理工大学专利事务所
代理人 罗观祥

权利要求书 1 页 说明书 3 页 附图页数 0 页

[54]发明名称 用大功率连续二氧化碳激光制备单壁碳纳米管的方法

[57]摘要

本发明是用大功率连续二氧化碳激光制备单壁碳纳米管的方法,其方法步骤:(1)按一定百分比在石墨粉中掺钴或镍粉或钴、镍混合物后经热压成复合石墨块作为靶材;(2)把复合石墨块放进反应室后,抽真空再加进氩气;(3)用反射镜、聚焦镜将 CO₂激光聚焦于复合石墨块靶材上,用 700 瓦以上 波长为 10.6 μ m 的 CO₂激光照射复合石墨块靶材,后取出用电子显微镜观察发现生长有产率达 50% 以上的单壁碳纳米管。本发明制备纳米管无需附加设备,使制备装置更为直接和简单成本低,并证明了用低能量长波长连续 红外激光也可制备单壁碳纳米管。

Name : High-power CO2 laser patents for the synthesis of single-walled carbon nanotubes

申请日Shen asked	2000-05-232000-05-23	申请号Application No.	00114290.900114290.9
公开日Open day	2000-11-152000-11-15	公开号No. open	CN 1273215ACN 1273215A
发明人Out the people	张海燕 何艳阳Mr Yang Zhang Haiyan	申请人地址Address of the applicant	510080广东省广州市山区风东路729号Wind East Road, Guangzhou City, Guangdong Province, mountain 510080 729
申请人Please people bid	广东工业大学Guangdong University	代理人Handling people	罗观祥Romanian-View
专利代理机构A patent agency	华南理工大学专利事务所South China University of Technology patent office		

本发明是用大功率连续二氧化碳激光制备单壁碳纳米管的方法，其方法步骤：（1）按一定百分比在石墨粉中掺钴或镍粉或钴、镍混合物后经热压成复合墨块作为靶材；（2）把复合石墨块放进反应室后，抽真空再加进氩气；（3）用反向镜、聚焦镜将CO₂激光聚焦于复合石墨块靶材上，用700瓦以上波长为10.6μm的CO₂激光照射复合石墨块靶材，后取出用电子显微镜观察发现生长有产率达50%以上的单壁碳纳米管。The idea is to use high-power CO₂ laser for the preparation of single-walled carbon nanotubes, their methods : (1) according to which a certain percentage of graphite powder doped cobalt or nickel or cobalt. Mexican Hot composite mixture of nickel after block as the target; (2) composite graphite blocks into the reaction chamber, with argon gas into the vacuum; (3) a reverse mirror, CO₂ laser confocal microscope will be focused on the target composite graphite blocks, with more than 700 watts of CO₂ laser wavelength 1.06 μm irradiated graphite block target, After using electron microscopy found out the growth rate of more than 50% of the production of single-walled carbon nanotubes.

摘要 Abstract

本发明制备纳米管无需附加设备，使制备装置更为直接和简单成本低，并证明了用低能量波长连续红外激光也可制备单壁碳纳米管。Preparation of this invention nanotubes without additional equipment to enable more direct and simple low cost device Preparation, and proved that the use of low-energy laser wavelength infrared single-walled carbon nanotubes can be prepared.

- noise-rejection scheme for an extrinsic Faraday current sensor. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, 7: 796-800
- 25 A. G. Podoleanu, N. E. Fisher, D. A. Jackson, A single fibre-optic down-lead Faraday current sensor. *Sensors and Actuators A*, 1997, 58: 225-228

Progress in Bulk-Optic-Material Current Sensors

Wang Zhengping Li Qingbo Sun Jinghua Wang Xiaozhong

(Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Wang Heping

(Harbin Watch Factory, Harbin 150040)

Abstract Many advances have been achieved in bulk-optical-material current sensing techniques since 1994, including those in sensing head designs, achievements in theoretical study and signal processing schemes.

Key words Faraday effect, optical current sensors, bulk-optic-material current sensors

碳纳米管

碳纳米管是一种具有显著电子特性和机械特性的独特纳米结构。研究界的兴趣首先集中在它奇特电子特性上,因为纳米结构可考虑作为一维量子线原器。随着它的其它有用特性特别是强度的发现,对纳米管的潜在应用产生了特别浓厚兴趣。例如,碳纳米管可用于纳米尺度电子学或用来加强聚合物材料。

理想纳米管可认为是由碳原子构成的并已卷缩成无缝圆柱体的六角形网,这种圆柱体只为纳米粗细,长度为几十微米,每端都盖着半个富勒烯分子。单壁纳米管可看成基础圆柱体结构,它们构成多壁纳米管的基本单元并称为“绳索”的有序单壁纳米管列阵。许多理论研究已预测了单壁纳米管特性。

显然,第一个纳米尺度的碳丝是由70年代由法国奥灵斯(Orleans)大学的M. Endo制备的。他用蒸汽生长技术生长了直径约7

nm的碳纤维,但这种纤维并不认为是纳米管,也未作系统研究。直到1991年,日本电气公司筑波实验室的Sumio Iijima用高分辨率透射电子显微术观察碳纳米管后,该领域才真正开始起步。莫斯科化学物理研究所的研究人员在同一时期独立发现了碳纳米管和纳米管束,但通常这种管子的长度直径比很小。俄罗斯研究人员根据这种纳米管的形状称其为“桶烯”。

英国萨塞克斯大学的Harold Kroto和美国赖斯大学的Richard Smalley等人发现的富勒烯促使研究人员对碳丝进行进一步探索。实际上,碳纳米管端部盖帽必然是类富勒烯的事实说明,碳纳米管直径只能是富勒烯分子般大小。

虽然Iijima首次观察的是多壁纳米管,但不到两年,他与加州国际商业机械公司阿尔梅登Donald Bethune等人一同观察到单壁

碳纳米管。1996年, Smalley 领导的赖斯研究小组首次合成了排成束的单壁碳纳米管。该碳纳米管束包括有许多细直径纳米管, 可进行与一维量子物理有关的实验。现在, 几个研究小组已测量了这种纳米管的某些显著特性, 证实了许多理论预言。

结构问题

少数重要研究工作已用高分辨显微术探索了碳纳米管结构。这些实验证明, 纳米管是以碳原子形成的六角形晶格(形成晶形石墨)为基础的圆柱形结构。视二维石墨片“卷缩”情况的不同, 可有三类纳米管, 分别称为扶手椅纳米管、之字形纳米管和手(征)性纳米管。

借助碳纳米管的单元晶胞——换言之借助于确定其结构的最小原子基团[图1(a)]最容易解释形成不同类型的原因。纳米管的所谓手(征)性矢量 C_h 由 $C_h = na_1 + ma_2$ 定义, 这里 a_1 和 a_2 是二维六角形晶格的单位矢量, n 和 m 是整数。另一重要参数是手(征)性角, 它是 C_h 和 a_1 之间的夹角。

将石墨片卷缩成纳米管的圆柱体结构时, 手性矢量的两端彼此相接。因此, 手性矢量形成纳米管圆形截面周长, 不同的 n 和 m 值构成不同的纳米管结构([图1(b)])。当 $n = m$ 及手性角为 30° 时形成扶手椅纳米管结构。当 n 或 m 等于零和手性角为 0° 时, 形成之字形纳米管。手性角处于 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间的所有其它纳米管称为手性纳米管。

纳米管的特性取决于其直径和手性角, 而这两个参数均与 n 和 m 有关。直径 d 仅是手性矢量长度除以 π , 亦即, $d = (\sqrt{3}/\pi)a_c(m^2 + mn + n^2)^{1/2}$, 这里 a_c 是平坦石墨片相邻碳原子间的距离。同样, 手性角由 $\tan^{-1}(\sqrt{3n/(2m+n)})$ 给出。

用扫描隧道显微术和透射电子显微术已进行纳米管直径和手性角的测量。但像测量电阻率之类物理特性一样, 同时测定 d 和 θ 仍是一个重大问题。部分原因是由于纳米管

很小, 部分原因是碳原子总是处在不断热运动中。其次纳米管也可遭受显微镜电子束的作用而破坏。

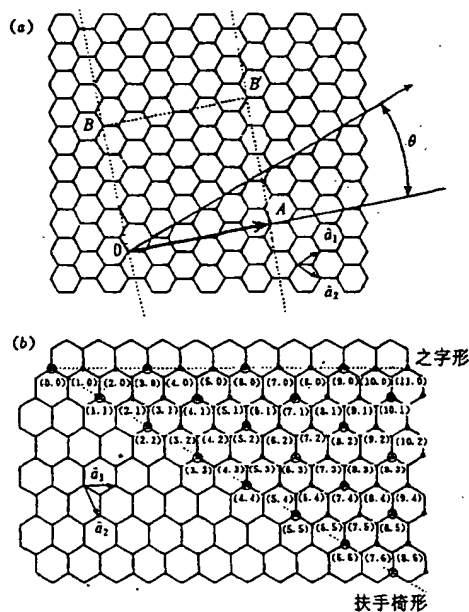


图1 纳米管结构基础。碳纳米管以二维石墨片为基础。(a) 六角形晶格的手性矢量定义为 $C_h = na_1 + ma_2$, 这里 a_1 和 a_2 为单位矢量, n 和 m 为整数。手性角 θ 相对于 a_1 方向而测量。本图中 $(n, m) = (4, 2)$ 纳米管的单位晶胞以 $OAB'B$ 为边界。为了形成纳米管, 设想晶胞的收缩是 O 触到 A 和 B 触到 B' , 并且两端都盖有半个富勒烯分子。不同类型的碳纳米管, n, m 值也不同。(b) 之字形纳米管相应于 $(n, 0)$ 或 $(0, m)$, 手性角为 0° 。扶手椅形纳米管具有 (n, n) 值, 手性角为 30° , 手性纳米管具有一般 (n, m) 值, 手性角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间。按照理论, 纳米管可以是金属性(绿圆圈)或半导体性(蓝圆圈)

由于纳米管中每一单元晶胞都包含大量六角形, 每一六角形又包含两个碳原子, 故纳米管晶胞包含有大量碳原子。如果纳米管的单元晶胞为六角形的 N 倍, 那末互协空间中的纳米管单元晶胞只为单个六角形的 $1/N$ 。

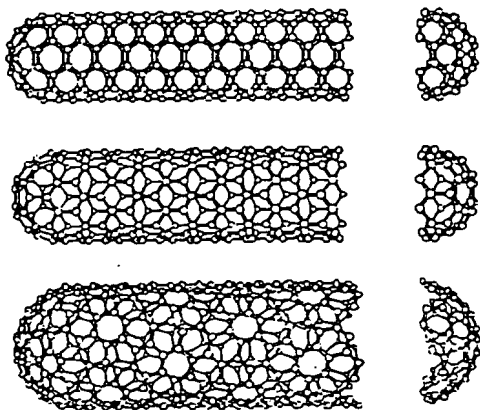


图2 纳米管模型。纳米管通过石墨片卷成圆柱体,圆柱体每端复有半个富勒烯分子。这里所示的三种纳米管参数为:上,扶手椅纳米管(5,5),中,之字形纳米管(9,0);下,手性纳米管(10,5)。纳米管的直径与 n, m 值有关

如何制作纳米管

1996年赖斯大学研究小组找到制作有序单壁纳米管束的较有效方法,为定量实验研究碳纳米管开辟了新机遇。这种有序纳米管在 1200°C 炉中用激光蒸发碳靶的方法制作。钴-镍催化剂有助于纳米管的生长,这也许是由于这种金属在合成期间能防止纳米管两端的复盖,并且可使70%~90%的碳靶转换成单壁纳米管。用间隔50 ns的两个激光脉冲可在很大体积内长时间保持生长条件。这种方案提供了较均匀蒸发和较好生长条件的控制。纳米管用流动氩气吹拂。

后来,法国蒙特利尔大学的Catherine Journet等人开发了一种生长类似单壁纳米管阵列的碳弧法。在此情况下,也用电离碳等离子体和等离子体放电产生的焦耳加热制作有序纳米管。其它几个研究小组也用这两种方法的变种制作了单壁纳米管束。然而,赖斯研究小组对该领域影响最大,主要是因为他首先开发了有效合成法并已形成许多为测量

单壁纳米管特性的国际合作。

在扫描电子显微镜下,这两种方法制作的纳米管材料看上去很像用碳绳编结的编织物。绳的粗细在10~20 nm之间,长度可达100 μm 。当用电子显微镜检查时,发现每根绳都由一束沿一个方向排列的单壁纳米管构成。一次能看许多条绳的X射线衍射显示,单壁纳米管直径分布范围很窄,表现为一个强分布峰。

对于赖斯和蒙特利尔小组所用的合成条件,直径分布峰位于 $1.38 \pm 0.2 \text{ nm}$ 处,非常接近理想(10,10)纳米管直径。宾州大学John Fischer等人所作的X射线衍射测量表明,成束单壁纳米管形成一种二维三角形晶格。晶格常数为1.7 nm,管子最近间距为0.315 nm,这与比利时J. C. Charlier等人的早年理论模型一致。

尽管多壁碳纳米管生长时不要用催化剂,但单壁纳米管生长却必须用催化剂。不过详细生长机制至今还未完全了解。实验表明,纳米管直径分布的宽度和峰与催化剂成份、生长温度和其它各种生长条件有关。现在正在大力进行不同平均直径下有更窄直径分布的各种研究并获得了较好生长过程的控制。从应用观点看,重点是低成本高产出生产纳米管的方法,为了能以商品化规模生长碳纳米管,也许需用某类连续工艺。

纳米管中的电子

碳纳米管的独特电子特性是由于电子在垂直于纳米管轴方向的量子幽禁。在径向,电子幽禁在石墨片单层厚度中。在纳米管圆周方向,周期性边界条件起作用。例如,如果之字形或扶手椅纳米管在圆周上有10个六角形,那末第11个六角形将与第1个相重合。绕圆柱体一周产生 2π 相差。

这种量子幽禁的结果,电子只能沿纳米管轴方向传播,它们的波矢量也沿这个方向,所形成的一维导带和价带数目与沿纳米管圆

周方向建立的驻波很有关。根据石墨片的已知色散关系,可用这个简单概念来计算一维导(禁)带的色散关系(这个关系使波矢与能量联系起来)。

日电公司筑波实验室的 Noriaki 等人和本文笔者之一 Riichiro Saito 已计算了细直径纳米管的色散关系(图3),表明细直径纳米

管约有 $1/3$ 是金属性的,其余为半导体性,具体与它们的直径和手性角有关[图(b)]。一般说,当 $|n - m| = 3q$ 时(这里 q 为整数), (n, m) 碳纳米管将是金属性的。所有扶手椅纳米管全为金属性,之字形纳米管 $1/3$ 为金属性。

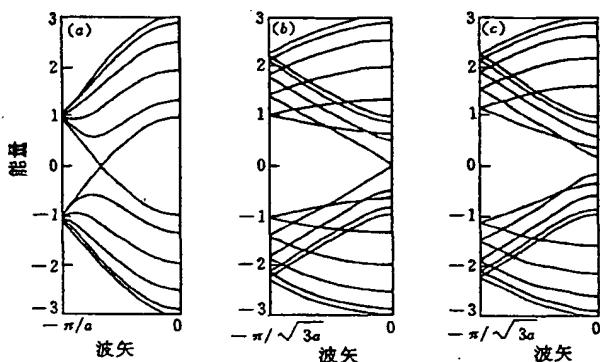


图3 纳米管的色散关系。这些色散关系说明三类纳米管中电子能量随波矢的变化,每条曲线都对应一个量子子带。费米能级在 $E = 0$ 处:即下能态完全被占据,而上能态完全是空的。在扶手椅(5,5)纳米管(左)和之字形(9,0)纳米管(中)中,为使电子激发到空激发态内,需要无限小能量,并且这种纳米管是金属性的。对之字形(10,0)纳米管(右),占据态和空态之间存在有限带隙,因此这种纳米管是半导体性的。直径的大小增大对碳纳米管导带特性有重大影响

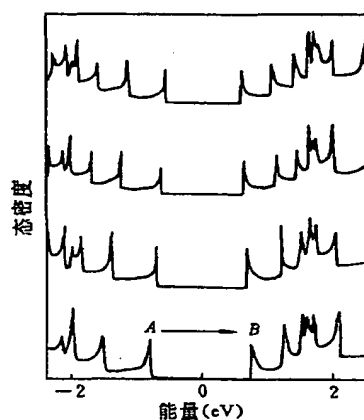


图4 金属性纳米管的能态。(8,8)、(9,9)、(10,10)和(11,11)扶手椅纳米管的一维态密度在一维带最大值和最小值位置处显示有分立峰。对这种金属性纳米管,态密度在 $E = 0$ 处并不为零。在镜像尖峰之间可发生光学跃迁,如 $A \rightarrow B$

对各种纳米管已计算了电子态密度与能量的关系。作为一例,考虑金属性(8,8)、(9,9)、(10,10)和(11,11)扶手椅纳米管的态密度(图4)。普通金属有光滑态密度,而这种纳米管有很多奇点特征,在奇点处,每个峰对应于一个量子子带。当要解释根据扫描隧道显微术和共振拉曼光谱法(这是两种对搞清一维纳米管特性有很大贡献的技术)所得的实验结果时,这些奇点就很重要。

虽然 n 和 m 的选择决定了纳米管为金属性还是半导体性,但两种情况下碳原子间的化学键完全相同。这个惊人结果是由于二维

石墨片(在零带隙时石墨片为半导体)具有非常特殊的电子结构。在此情况下,价带顶部与导带底部能量相同,并且,对一个特定波矢,即所谓二维布里渊区的 k 点(也就是互逆空间中六角形单元晶胞的拐点),该能量等于费米能量。理论证明,当某纳米管允许圆周方向波矢通过该 k 点时,那末纳米管就变成金属性。

随着纳米管直径的增大,圆周方向允许有更多波矢。由于半导体性纳米管的带隙与管子直径成反比,在大直径时此带隙趋于零,情况有点像石墨片。纳米管直径约为 3 nm

时,带隙变得与室温时的热能差不多。

Riichiro Saito 和 Charlier 的计算表明,金属-半导体和半导体-金属同心对纳米管是稳定的。因此,纳米尺度器件可用两个同心纳米管或纳米管之间的结作基础。例如,由较粗半导体性(或绝缘性)纳米管包围的金属性内管将形成纳米尺度的屏蔽缆。人们必然会设想完全用碳做成而无需掺杂、同时又有金属和半导体特性的纳米电子器件。

测量与理论

检验这些理论预言的实验一直很难进行,主要原因是电子特性预计与纳米管直径和手性有很大关系。除了与在纳米粗细结构上做电子和光学测量的相关问题外,重要的是要获得纳米管对称信息(即它的 n 和 m 值)。尽管有这些困难,开创性实验工作已证明了有关纳米管电子结构的主要理论预言。

由于优质单壁纳米管不能相当大量地获得,早期一些实验主要集中在多壁纳米管。然而开始时,对单个多壁纳米管的测量未能测出任何一维量子效应,主要原因是纳米管的直径太大或研究不是在足够低的温度下进行。

虽然有这些问题,对单个多壁纳米管的某些早期实验确实也探测了各种各样电气新特性,其中包括由于弱定域和整体传导系数波动所产生的二维量子干涉效应。但多壁纳米管的结果因不同直径和不同手性同心纳米管的同时作用而复杂化。另外,纳米管的缺陷可能产生电子散射,对所有组成的纳米管不能作可靠电接触。电接触的导电性也影响电子输运。对这种奇特输运现象的进一步研究应在细直径多壁纳米管和低温下进行,这时可以观测到一维量子效应。

1994年取得了关键性突破,这时,美国密歇根通用汽车研究实验室的 Charles Oik 等人用扫描隧道显微镜(STM)测量了单个多壁纳米管,这些结果为有些纳米管是金属

性而另一些是半导体性提供了首次证明。Oik 等人还指出,半导体纳米管的带隙与 $1/d_t$ 成比例,与理论预言一致。不过这种技术对多壁纳米管的外壳层最灵敏,因为扫描隧道显微镜探针空间范围较短。最近荷兰德尔夫特技术大学所做的扫描隧道显微镜实验已清楚地展示了预测的一维态密度以及金属性和半导体性纳米管之间行为的差异。

1998年初,德尔夫特的 Cees Dekker 等人 与赖斯大学研究小组合作,首次测量了只有纳米直径的单个单壁碳纳米管的电子输运。由加州大学伯克利分校 Paul McEuen 领导的另一研究小组也与赖特小组合作,对构成单壁碳纳米管的单条“绳子”进行了有关测量。

这两个实验研究都在低于 1 K 温度下进行,并集中在单壁碳纳米管的“量子点”形态上。虽然纳米管的长度远大于其直径(一般为 10^4 倍),但管子的有限长度仍限制了沿纳米管轴向允许的波矢数。这引起能态的分立,而这种分立可通过测量传导系数与电压的关系而确定。对 3 μm 长的纳米管,德尔夫特小组发现,费米能级附近的分立能态间隔约为 0.6 meV。随着单壁纳米管的日益可得,我们可以预期,很快就能获得具有 n 和 m 值的碳纳米管的电压-电流特性曲线。然后,可用这种信息来验证理论所预言的一维色散关系。

由于纳米管通常为几微米长,可用现代光刻技术来制作电接触,因此,单壁碳纳米管为研究单分子晶体管效应提供了一种独特的系统,在这种晶体管中,紧挨导电纳米管的电极用来调制导电系数。

把一个电子加到单壁纳米管上所需的能量也已作测量。为克服 3 μm 长、1 nm 直径纳米管内电子间的库仑斥力,需用约 2.6 meV 的电压。研究人员现已开始系统研究碳纳米管的这种“库仑阻塞”现象。

合成碳纳米管技术的新近进展也促进了金属性和半导体纳米管结的实验研究,该研

究又进一步激起了有关电子应用的讨论。对单壁纳米管的实验研究同时也验证了我们和东京大学 Hiroshi Ajiki 等人最近的一项预言,即磁场中的色散关系。

纳米管的光学研究

碳纳米管最有意义的一些一维量子效应已用拉曼光谱法进行了观察,拉曼光谱通过光的非弹性散射探测材料的晶格振动或“声子”。加州大学洛杉矶分校的 Radi Jishi 用区域折迭法以及肯塔基大学 Ernst Richter 等用从头开始模拟法先后计算了纳米管声子的一维色散关系。这些计算表明存在许多不同振动模,这乃是纳米管单元晶胞存在大量碳原子的结果。一般说,随着纳米管直径和单元晶胞尺寸的增大,出现的声子模较多。

在这些振动模中,只有少数模能被拉曼散射激发。拉曼激发模的数量与纳米管直径无关,因而有可能研究每一振动模频率和振动强度与纳米管直径的关系。已经发现,有些振动模对纳米管直径非常灵敏,而另一些则不灵敏。

我们和肯塔基大学的同事已对赖斯研究小组生长的单壁碳纳米管绳进行了拉曼散射实验,这种管绳集结了很多(9,9)和(10,10)扶手椅纳米管。该实验采用了共振拉曼增强效应,即让激光频率与两个态密度峰之间(图4)允许的光学跃迁能量相匹配,共振大大提高了所观测的拉曼效应的强度。

肯塔基研究小组和威尔明顿杜邦研究实验室的 Bruce Chase 测量了几种不同激光激发能量(图5)下的拉曼光谱。由于电子态能量与纳米管直径有关,激光频率变化使不同直径的碳纳米管进入共振。 1580 cm^{-1} 频率附近的大量振动模形成光谱突起,这些振动模与纳米管直径只有微弱的关系。在 186 cm^{-1} 附近也有很强振动模,且与纳米管直径密切相关。这个特性与径向呼吸模相对应,在这种模中,纳米管内的所有原子都向外(或向内)

位移了一个相同量,因此,振动碳原子网的对称性保持不变。从所测的径向呼吸模频率,我们可以确定处于与激光频率共振状态下的纳米管直径。

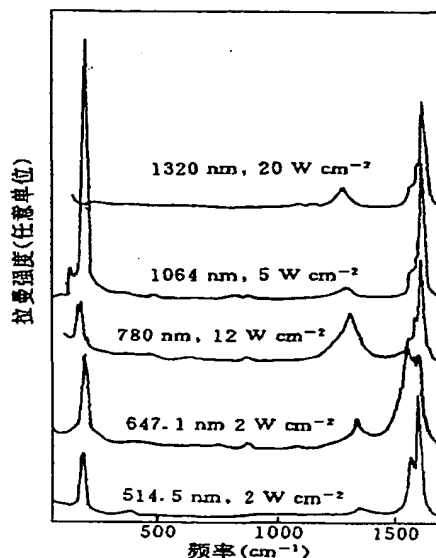


图5 纳米管的光散射。经5种不同波长激光激发后,在室温下测得的单壁碳纳米管的拉曼光谱。1320 nm 波长相应于光子能量为0.94 eV,其它波长分别相应于1.17、1.58、1.92和2.41 eV。 1580 cm^{-1} 频率处的峰值与纳米管直径没有多大关系,而 186 cm^{-1} 频率处的峰与纳米管直径有关

探测拉曼光谱下的这些量子效应使对单壁碳纳米管具有一维电子和声子结构概念产生了很强可信感。这些实验再加上最近德尔夫特技术大学 Jeroen Wilder 等人的扫描隧道显微镜观测已为电子态密度具有一维系统所特有的拐点提供迄今最清晰的证明。

应用实力

另一振奋人心的领域是碳纳米管的机械特性。通过与石墨和碳纤维的类比,预言纳米管是非常牢固的,并且具有很大弹性模量。1996年,由日本电气公司普林斯顿实验室

(新泽西州) Thomas Ebbeson 领导的一研究小组通过测量一端夹住的纳米管的另一自由端发生的振动, 估计了碳纳米管的杨氏模量。他们的估计与石墨片上测得的特大杨氏模量值(约 1 TPa) 相一致。

单壁碳纳米管预计也甚为牢固, 并且在拉伸状态下耐碎裂, 很像通常航空应用中所用的碳纤维。根据北卡罗莱纳州立大学 Jerzy Bernholc 等人的计算, 纳米管可以拉长百分之几而不碎裂。但又与碳纤维不同, 单壁纳米管惊人的柔软, 它可以扭曲、弄平、弯成小圆或进行弯折而不破碎; 并且, 纳米管截面严重畸变也不会断裂。此外, Bernholc 等人所做的分子动力学模拟表明, 去掉使纳米管变形的应力后, 在很多情况下, 纳米管仍保持原来形状。

纳米管的另一优点是它在受压缩时的行为。与受压下很易破碎的碳纤维不同, 碳纳米管产生的扭转形褶折在去掉应力后能弹性复原。因此, 纳米管不只具有碳纤维所希望的特性, 而且更为柔软, 可以压缩而不碎裂。这种优良机械特性可导致自身功能的应用或自身功能与其它希望特性相结合的应用。

北卡罗莱纳大学的 Richard Superfine 等人指出, 碳纳米管的机械特性使它可很理想地用于其它纳米尺度结构的控制。因此, 对碳纳米管理解方面的进展将对整个纳米技术领域产生重大影响。现正在考虑的许多应用涉及多壁纳米管, 部分原因是这种纳米管可做得更长, 以及这种管子的许多应用并不依赖于主要在单壁纳米管中发现的一维量子效

应。

有人已经提议, 碳纳米管可用于显示器或电子探针的尖部。伦斯勒工学院(纽约州特洛伊)的 Pulickel Ajayan 等指出, 纳米管盖帽的化学活泼性高于圆柱体。瑞士一研究小组指出, 盖帽是有效电子发射体。其它应用可能是基于纳米管可在其中空芯内保持较高的气压。哈佛大学的 Charles Lieber 也提出, 碳纳米管可起着合成的纳米尺度新碳化物模板的作用。

如已看到的, 以碳纳米管为基础的结构为纳米尺度电子应用提供了令人振奋可能性。与碳纤维用于聚合物来加强结构或增大主要成份导电率的情况相似, 碳纳米管与基质聚合物(或金属)组合, 可使这种聚合物的物理特性适合特定应用。由于碳纳米管如此之小, 以致它们可用于聚合物, 使其形成特殊形状, 或用于低粘度化合物, 把它们喷洒在表面上, 形成导电漆或导电膜。从科学和实用观点看, 纳米管-聚合复合物的流变性的基础研究是有意义的。

对碳纳米管的研究劲头至少今后几年肯定还将继续。电子结构上的量子效应和其它独特特性将进一步加以探索, 特别是随着经过很好特性表征的单壁纳米管的更广泛可得。单壁纳米管的实验还将探测它们的晶体振动(如用拉曼光谱术测量)和机械特性。随着我们对纳米管了解的增多, 产生新型电子器件和新复合材料正是各种未来应用的开端。

(从 征供稿)

(上接第 34 页)

该仪器可以探测海水中每升约 5 ng 含量的砒。所探测的大部分信号来自光缆头部的 2~3 mm 处, 具体与所取样的水的光学密度有关。研究人员把他们的信号相对于水的拉曼信号归一化。Chen 说, “这就是我们可对

激光脉冲差异和光学密度差异归一化的方法。”该系统可每 10 s 测量一次, 测量间距约为 20~30 m。

Chen 说, 取 10 或 15 次采样进行调查,

(下转第 25 页)